

朱亚美, 田元, 印萍, 等. 8 ka 来东海内陆架泥质区高分辨率沉积记录对东亚冬季风的响应[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 1-10.

ZHU Yamei, TIAN Yuan, YIN Ping, et al. Response of high-resolution sedimentary records to East Asian winter monsoon in the inner shelf of the East China Sea over the past 8 000 years[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 1-10.

8 ka 来东海内陆架泥质区高分辨率沉积记录 对东亚冬季风的响应

朱亚美^{1,2}, 田元^{2*}, 印萍^{2,3}, 段晓勇², 曹珂², 刘冬雁¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;

3 中国地质调查局舟山野外科学观测研究站, 青岛 266237)

摘 要:依据东海内陆架泥质区 D03 钻孔岩芯沉积物高分辨率粒度分析结果, 筛选了对东亚冬季风有良好显示的敏感粒级, 结合高精度年代框架, 揭示了近 8 ka 以来东亚冬季风波动在泥质区的沉积记录, 包括 11 个千年尺度的气候波动事件和 5.4~4.9、1.8 kaBP 以来的百年尺度的快速气候波动。与石笋、冰芯和泥炭的氧同位素曲线对比发现, 东亚冬季风增强与世界范围的“8.2 ka”、“4.9 ka”、“3.8 ka”、“1.4 ka”和小冰期事件均有良好的对应关系, 建立了全新世东亚冬季风增强与气候变冷事件的内在联系。8 ka 以来东亚冬季风的演化大致可以分为 3 个阶段, 即 8.2~4.8 kaBP 中高频波动期、4.8~1.8 kaBP 波动较弱稳定期和 1.8 kaBP 以来的高频波动期。

关键词:东海内陆架; 敏感粒级; 东亚冬季风; 全新世; 沉积记录

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.333

0 引言

全球变化是当今地球科学研究中的热点, 获取高分辨率的地质记录, 是重建过去气候变化的重要基础。陆架边缘海是海陆相互作用的关键区域, 汇聚了丰富的陆海物质, 记录着海平面变化、物质供给、气候变化以及地球化学循环等大量信息。全新世高海平面以来, 中国东部陆架区形成的泥质沉积体具有连续、稳定及高沉积速率的特点, 是开展高分辨率气候变化研究的良好材料。

对沉积物粒度数据进行处理, 提取对沉积环境变化敏感的粒度组分, 据此重建地质历史时期的古

气候、古环境事件是第四纪研究的重要手段^[1-3]。受环境影响的沉积物敏感粒级范围往往很小, 因此对粒度数据中响应特定环境粒度组分的提取和甄别, 是研究不同沉积环境及其动力条件的基础。中国东海陆架处于东亚季风活动的影响区域, 沿岸流在季风的影响下, 夏季向北运移, 冬季向南运移^[4]。受东亚季风模式影响, 沿岸流总体上表现为夏季弱、冬季强, 因此长江入海物质自河口向远端搬运具有“夏储冬输”的输运模式^[5]。冬季长江口附近再悬浮的底质沉积物在沿岸流的携带下向南运移, 在浙闽沿岸沉积形成泥质区。冬季风越强, 沿岸流的携带搬运能力越强, 所搬运的悬浮体颗粒越粗, 提取出的敏感粒级也越粗^[6-11]。

东海内陆架泥质沉积体自长江水下三角洲向南, 沿浙闽近岸一直延伸到台湾海峡中部, 全长约 800 km, 宽约 100 km。泥质体呈楔形分布于水深 50~60 m 以浅的内陆架之上, 高海平面以来最大沉积厚度可达 40 m, 有南北 2 个主要的沉积中心。南部沉积中心在甌江口外水深 40~50 m 处, 北部沉积中心位于象山半岛东侧水深 20~30 m 处。研究普遍认为, 东海内陆架泥质区的形成始于 12.3 kaBP,

收稿日期: 2021-12-15

资助项目: 中国-东盟海上合作基金“长江三角洲与红河三角洲全新世沉积演化对比研究”(2015—2018 年); 中国地质调查局项目“浙江中部海岸带综合地质调查”(DD20190276)

作者简介: 朱亚美(1993—), 女, 硕士, 主要从事第四纪地质与海洋沉积学方面的研究工作。E-mail: 18435121504@163.com

* 通讯作者: 田元(1989—), 男, 博士, 主要从事海洋地质与海岸带环境地质方面的研究工作。E-mail: yuantian@ouc.edu.cn

长江物质在沿岸流的作用下向南运移,并逐渐堆积在此处,其具有沉积速率高、沉积厚度大、沉积连续的特点,蕴藏着丰富的海陆相互作用和气候变化的高分辨率信息^[12-15]。肖尚斌等^[12]利用粒度数据资料恢复了泥质区近8 ka以来东亚冬季风的演化过程;张晓东等^[16]利用粒度端元模型提取了近百年来东海内陆架沉积气候信息。但以上工作研究或时间尺度较短,或研究材料的分辨率较低。本文以在东海内陆架泥质区获取的长岩芯为研究材料,开展高分辨率粒度分析,结合高精度的测年数据,统计敏感粒级时间分布特征,以期建立敏感粒级变化与东亚冬季风波动的对应关系,重构8 ka以来百年和千年尺度的季风气候事件。

1 材料与方法

本文所采用的D03钻孔(27.53°N、121.47°E、水深41 m)沉积物岩芯(图1),系依托“中国-东盟海上合作基金——长江三角洲与红河三角洲全新世沉积演化对比研究”项目,由勘407轮于2015年12月钻取,样长41.2 m,平均取芯率90.4%。在室内对岩芯进行了详细岩性描述和分样,本研究选取岩芯上部20 m连续细粒沉积段进行分析,以2 cm间隔取样,共测试粒度样品920个。

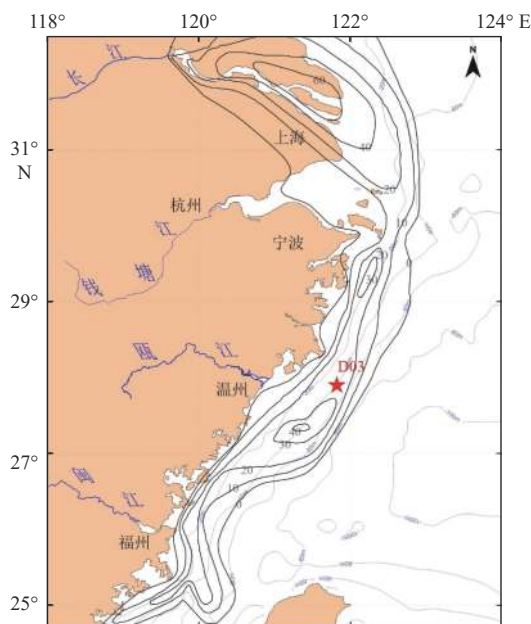


图1 研究区D03孔位置图

Fig.1 Location of core D03 in the study area

粒度分析采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪,取0.5~1 g样品放入50 mL烧杯中,加入5 mL浓度为10%的H₂O₂,静置24 h去除有机质;将盛有

样品的烧杯用电炉煮沸5 min,以去除过量的H₂O₂,然后加入5 mL浓度为0.1 mol/L的HCl,去除样品中的生物钙成分;用滴管吸出上清液,加蒸馏水稀释,放入5 mL分散剂(0.5 mol/L六偏磷酸钠),用玻璃棒搅拌,使样品颗粒充分分散,静置24 h,用滴管吸出上清液,再次加入蒸馏水,超声震荡2 min,使之充分分散后上机测试。测量范围为0.02~2 000 μm,重复测量相对误差<1%。粒度分析测试工作在自然资源部海洋地质实验检测中心完成。

黏土矿物分析采用XRD射线衍射法,取沉积物样品5~10 g,加入30 mL的15% H₂O₂,反应12 h去除有机质。根据Stokes沉降法,提取<2 μm沉积物颗粒,制成定向薄片,置于60 °C乙二醇蒸汽中,饱和处理12 h后上机测试。测试仪器为D/Max-2500型X射线衍射仪。根据BISCAYE^[17]方法定量计算黏土矿物相对百分含量,以伊利石10 Å衍射峰面积、蒙脱石17 Å衍射峰面积、高岭石绿泥石7 Å衍射峰面积计算含量,权因子分别为1、4和2。以高岭石(3.58 Å)和绿泥石(3.54 Å)峰面积计算各自含量。样品测试在自然资源部海洋地质实验检测中心完成,平均重复测试误差<5%。

采用AMS¹⁴C进行测年,材料为底栖有孔虫。将样品放入烧杯中,加入H₂O₂除去有机质,充分分散后过筛冲洗,烘干后挑选大小均一、壳体完整的底栖有孔虫待测,有孔虫鉴定和挑选由中国地质大学(北京)完成。AMS¹⁴C测试在美国Beta实验室完成。测试年龄以5 568 a为半衰期,利用δ¹³C进行同位素分馏效应校正,获得惯用年龄后进行海洋碳库校正(ΔR为-66±30)^[18]和树轮校正(Marine 20, <http://calib.org/marine/>),校正软件为Calib 8.10。最终获得日历年龄。日历年龄从公元1950年起算,以aBP/kaBP表示。

2 结果

2.1 岩性

D03岩芯主要为灰色、灰黄色黏土质粉砂,部分层位存在粉砂质砂或细砂夹层。依据钻孔岩性特征,D03岩芯自上而下可划分成4个沉积单元,岩芯详细描述和沉积环境分析见作者硕士毕业论文^[19]。其中,上部20.2 m(DU1+DU2,以下简称上部)沉积环境稳定连续,为8.2 ka以来从海侵体系域(DU3,顶部为细沙沉积层)过渡到高位体系域的

沉积产物,为浅海相沉积(图 2)。0~3 m 主要以灰黑色泥质粉砂为主,质地均一,无生物扰动痕迹。3~4.4 m 粒度变粗,为灰色、灰黄色细砂质粉砂和含砂泥质粉砂为主,可见贝壳碎屑(图 3A-1 和 A-2)。

4.4~20.2 m 为灰色和灰黄色泥质粉砂,质地均一,分选好,无明显层理,局部夹粉砂条带,偶见贝壳碎屑(图 3B-F)。底部为向 DU3 过渡的粉砂和细砂夹层(图 3G)。

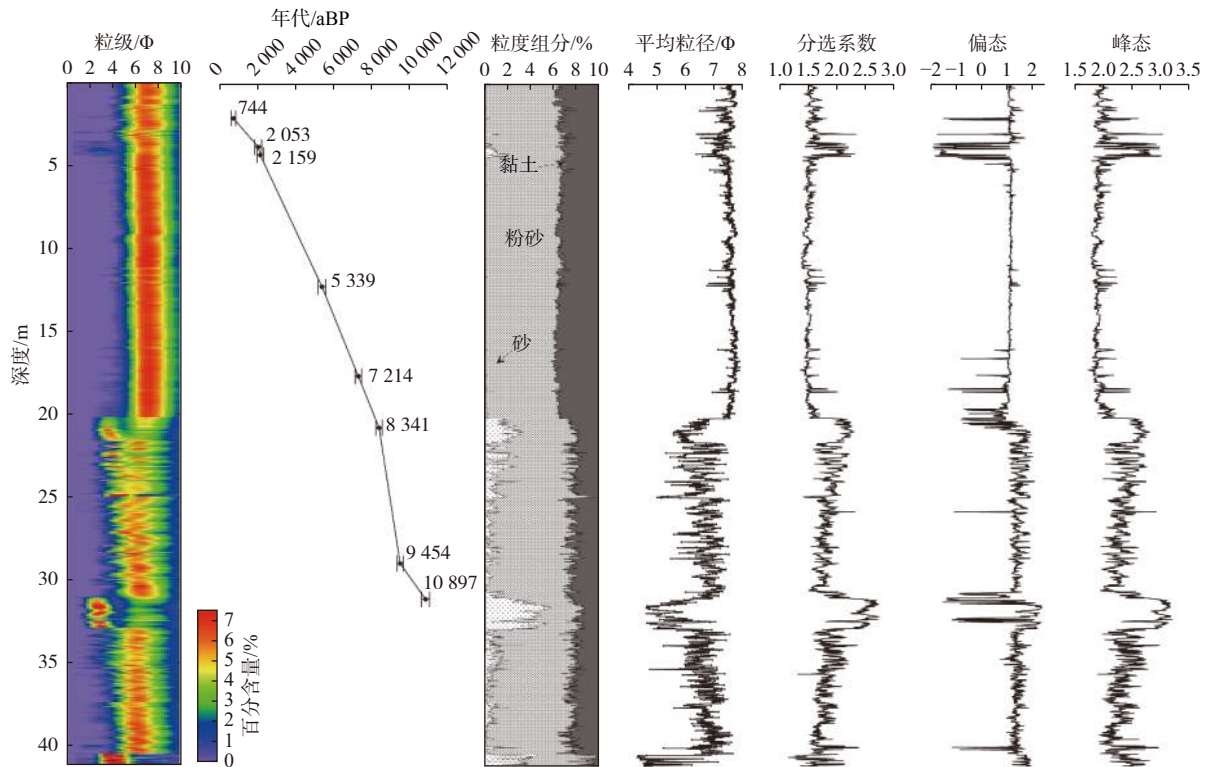


图 2 D03 岩芯综合柱状图、年代框架和粒度特征

Fig.2 Comprehensive logging, dating and grain size of the core D03

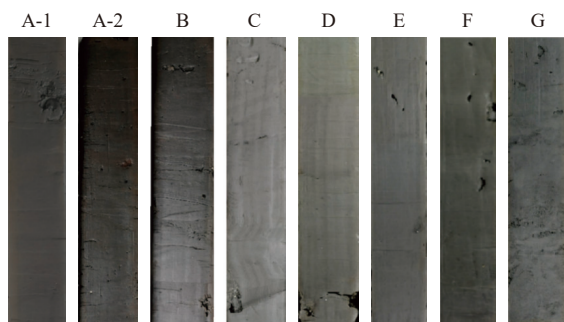


图 3 D03 上部岩芯沉积物照片

Fig.3 Photos of the upper layer sediments of core D03

2.2 年代框架与沉积速率

D03 采用 AMS¹⁴C 测年,材料为底栖有孔虫。为更好地建立岩芯的年代框架,重点选取了压扁卷转虫(*Ammonia Comperessiuscula*)单种进行 AMS¹⁴C 测年,在无法挑取足够的压扁卷转虫测年材料的情况下,挑选希望虫(*Elphidium* spp)单种测年,在 2 个单种均无法满足测年要求时,采用压扁卷转虫和希望虫混样测年(表 1)。

D03 上部岩芯测年数据自下而上年龄由老到新,无年龄倒转现象,沉积速率相对变化小,说明该岩芯总体沉积连续,沉积环境稳定。根据 AMS¹⁴C 测年结果构建岩芯的沉积年代框架(图 2),计算出的上部岩芯沉积速率平均值为 0.25 cm/a,变化范围 0.13~0.45 cm/a,主要分布在 0.25~0.29 cm/a 区间(表 1)。

2.3 粒度特征

D03 上部岩芯沉积物组成以泥和粉砂为主(表 2, 图 2),砂、粉砂和泥的含量范围分别为 0~22.98%、52.35%~79.53%和 19.54%~42.63%,平均值为 0.52%、64.11%和 35.38%。平均粒径、分选系数、偏态和峰态的范围分别为 6.38Φ~7.90Φ、1.37~2.34、-1.91~1.68和 1.75~3.05,平均值为 7.55Φ、1.54、0.99和 1.97,总体为正偏态,峰态中等,分选较好,个别砂-泥夹层分选差。

沉积物粒度垂向分布相对均匀,变化不大,在 3.6~4.4 m 段附近含砂量增加,最高达 22.98%,粒

表 1 D03 岩芯 AMS¹⁴C 测年数据和沉积速率

Table 1 AMS¹⁴C dating and calculated sedimentation rate of the core D03

深度/m	测年材料	¹⁴ C 年龄/aBP (¹⁴ C)	日历年龄/aBP	沉积速率/(cm/a)
2.07	压扁卷转虫	1 290±30	744(622~900)	0.26
3.80	压扁卷转虫	2 490±30	2 053(1 879~2 260)	0.13
4.28	压扁卷转虫	2 570±30	2 159(1 986~2 321)	0.45
12.23	希望虫	5 100±30	5 339(5 138~5 513)	0.25
17.64	压扁+希望虫	6 830±30	7 214(7 037~7 379)	0.29
20.75	压扁+希望虫	7 980±0	8 341(8 180~8 493)	0.28
28.95	压扁卷转虫	8 880±30	9 454(9 289~9 588)	0.74
31.10	压扁卷转虫	9 940±30	10 897(10 684~11 102)	0.15

表 2 D03 上部岩芯沉积物粒度参数

Table 2 Grain size parameters of the upper layer sediments of core D03

参数	砂/%	粉砂/%	泥/%	平均粒径/ Φ	分选系数	偏态	峰态
最小值	0	52.35	19.54	6.38	1.37	-1.91	1.75
最大值	22.98	79.53	42.63	7.90	2.34	1.68	3.05
平均值	0.52	64.11	35.38	7.55	1.54	0.99	1.97

度参数也在该段呈现出较为明显的变化,分选系数在 4.2 m 处增大到 2.32,分选较差,相应的偏态值为 -1.31,属于负偏,峰态值增大到 2.83,属宽—很宽。粉砂含量显示出比砂含量更高频率的小幅波动,同步出现分选系数、偏态和峰态的波动。本文将重点讨论粒度波动和气候环境事件的相关性。

2.4 黏土矿物

D03 上部岩芯黏土矿物主要以伊利石为主(图 4),含量为 59.3%~75.6%,平均 66.4%;高岭石、蒙脱

石和绿泥石含量较为接近,变化范围 2.7%~13.5%、0.9%~25.3% 和 4.5%~19.5%,平均含量分别为 8.6%、13.8% 和 11.3%。伊利石化学指数变化范围是 0.33~0.61,平均值为 0.47;伊利石结晶度变化范围是 0.25°~0.53°,平均值为 0.37°。垂向上,伊利石含量自下而上呈波动减少再增加的变化趋势,蒙脱石变化与伊利石相反,呈波动增加再减少的趋势,高岭石、绿泥石含量变化相对稳定。

黏土矿物三角端元图被广泛用于物源判别,本文采用了蒙脱石-伊利石-(高岭石+绿泥石)三角端

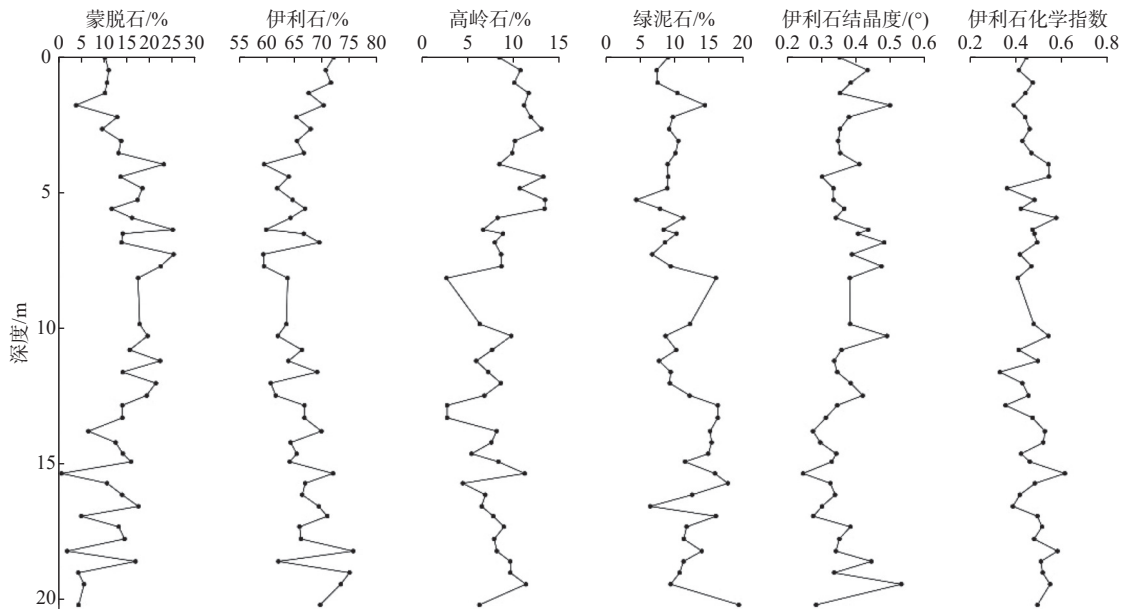


图 4 D03 岩芯上部沉积物黏土矿物变化

Fig.4 Vertical variations of clay minerals in upper layer sediments of the core D03

元分析法, 将 D03 及潜在物源区沉积物黏土矿物数据投点到端元图上(图 5)。可以看出, D03 岩芯上部沉积物黏土矿物数据的投点与长江沉积物分布区几乎全部重合, 与浙江及台湾河流投点区相对较远。与长江的黏土矿物整体组成相似, D03 沉积物也以伊利石含量最高为特征, 但高岭石和绿泥石的含量略低于长江沉积物。黏土矿物组成说明 D03 上部岩芯的细颗粒沉积物主要来源于长江入海物质的沿岸运输, 物质来源相对稳定, 这是利用沉积物粒度敏感粒级讨论冬季风变化的基础。

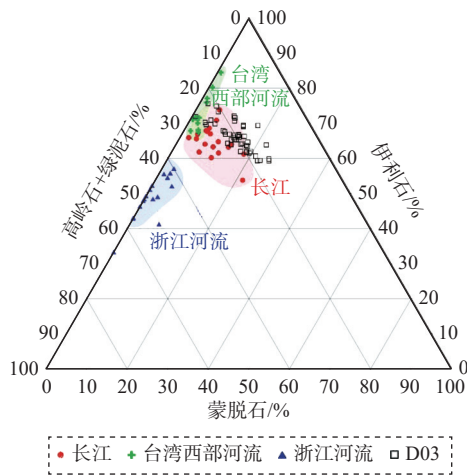


图 5 D03 上部沉积物黏土矿物三角端元图

Fig.5 Ternary diagram of clay minerals of upper layer sediments of the core D03

3 讨论

3.1 岩芯敏感粒级及其地质意义

D03 岩芯沉积物物源主要来自于长江入海沉积物, 由沿岸流搬运, 沿岸流的强弱势必影响沉积物粒级的组成。在夏季, 大量陆源物质由长江及其支流入海, 沿岸流弱甚至完全消失, 波浪能量低, 大部分泥沙在长江入海口门及水下三角洲沉积, 仅有少部分细颗粒以均匀悬浮的方式向内陆架搬运。在冬季, 强的冬季风暴时常发生, 波浪能量高, 向南的浙闽沿岸流增强, 导致夏季沉积在长江口及邻近海域的沉积物被重新悬浮起来, 通过递变悬浮的方式沿岸搬运, 在浙闽沿岸的内陆架地区沉积下来, 这种水动力环境有利于较粗组分沉积物的搬运和沉积。

研究发现, 沉积物组分中特定的粒级分布对某一种水动力变化敏感, 随着水动力的强弱变化而相应地变化, 因此利用敏感粒级可以反映沿岸流的强

弱, 并进一步反演东亚冬季风的强弱变化^[2-3,6-12,20-21]。根据前人研究, 7 kaBP 起浙闽沿岸流开始形成, 泥质区处于冬季沿岸流控制下的浅海沉积环境, 泥质沉积体快速堆积形成。受控于全新世高海面以来相对稳定的海平面背景和稳定的物源供应, D03 上部岩芯沉积物粒径较细, 纵向上没有出现大的波动, 沉积作用连续且沉积速率较为一致, 特定的粒级组分对东亚冬季风的变化更为敏感, 并保存在沉积物记录中。

根据 D03 上部岩芯沉积物粒度分析结果, 绘制 C-M 图(图 6)。其中, 细粒部分(图 6, A 组)在水体中以均匀悬浮的方式搬运, 并自然沉降沉积。较粗部分在 C-M 图上近平行于 C=M 线(图 6, B 组), 以递变悬浮方式搬运, 随水动力强弱变化粒级组成, 在水动力减缓的时候沉积。最粗的部分在 C-M 图上近平行于 M 坐标轴(图 6, C 组), 这部分粗颗粒含量相对较少, 推测可能是生物成因物质, 如硅藻、颗氏藻等, 也有可能是风暴潮活动带来的粗颗粒矿物^[20-23], 难以反映正常水动力状况。

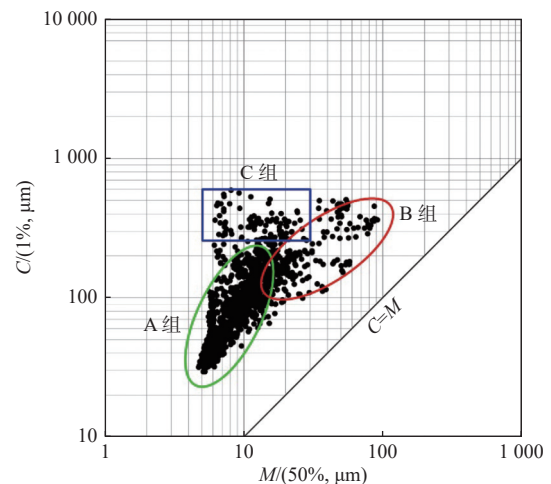


图 6 D03 上部岩芯沉积物 C-M 图

Fig.6 C-M scatter plot of grain sizes of upper layer sediments of the core D03

根据沉积物粒径-标准偏差曲线可分辨出细、较粗和粗 3 个粒级区间(图 7)。选取峰值附近的粒径组分作为敏感粒级, 这里分别称之为敏感粒级组分 1(简称敏感粒级 1, 下同)、敏感粒级组分 2 和敏感粒级组分 3(表 3)。敏感粒级 1 位于细粉砂区间, 以细粒沉积为主, 反映受浙闽沿岸流控制、相对稳定的弱沉积动力条件。肖尚斌等^[3]对东海内陆架 DD2 孔的研究认为, 粒径 $>45 \mu\text{m}$ 的组分是风暴流携带的产物, 敏感粒级为 $130 \mu\text{m}$, D03 岩芯敏感粒级 3 峰值约为 $114.6 \mu\text{m}$, 可以认为是风暴沉积的敏

感指标。综合以上讨论,本文选择敏感粒级 2 作为研究区东亚冬季风强度的替代指标。

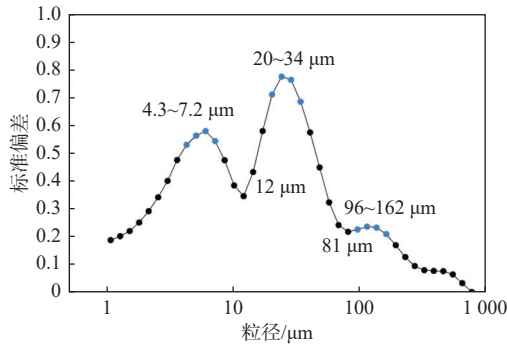


图 7 D03 上部岩芯沉积物粒径-标准偏差曲线图

Fig.7 Standard deviation vs grain-size of upper layer sediments of the core D03

3.2 敏感粒级对东亚冬季风的响应

东亚冬季风直接控制着沿岸流的强弱,沉积物粒度可以反映沿岸流的强弱,并作为一种替代性指

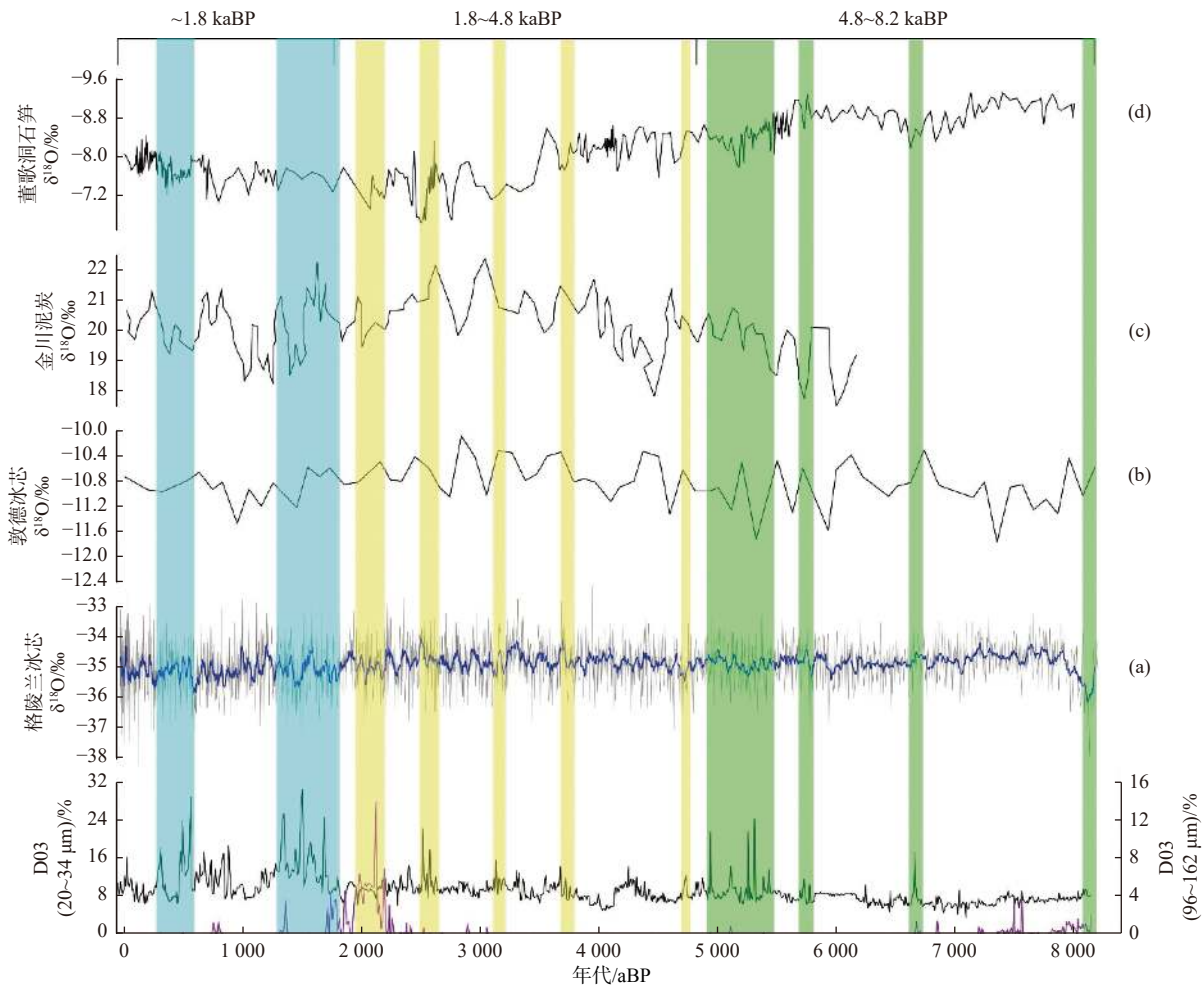
表 3 D03 上部岩芯沉积物敏感粒级组成

Table 3 The composition of sensitive grain size of upper layer sediments of the core D03

参数值	粒径区间/ μm	峰值/ μm	百分含量/%		
			最大值	最小值	平均值
敏感粒级1	4.3~7.2	6	30.5	10.5	25.2
敏感粒级2	20~34	24.1	31.8	3.7	9.1
敏感粒级3	96~162	114.6	14	0	0.2

标反演东亚冬季风的演化。当东亚冬季风增强时,沿岸流强度增大,搬运的物质平均粒径也增大,敏感粒级 2 百分含量增多,因此,可以通过提取敏感粒级 2 含量变化显著的层位对应的时间和变化周期,与敦德冰芯^[24]、格陵兰冰芯^[25]、金川泥炭^[26]氧同位素曲线揭示的古气候变化时间进行对比,探讨东亚冬季风变化与古气候的对应关系。

根据 D03 上部岩芯敏感粒级 2 分析结果,基于年代框架,共识别了近 8 ka 来 11 个明显的东亚冬季风加强时期(图 8),与冰芯、石笋和泥炭所记录的



(a)格陵兰冰芯氧同位素^[25]; (b)敦德冰芯氧同位素^[24]; (c)金川泥炭氧同位素^[26]; (d)董歌洞石笋氧同位素^[27]

图 8 D03 上部岩芯敏感粒级与其他气候事件记录对比

Fig.8 Comparisons between sensitive grain size of core D03 and proxies of other records

气候变冷时间有良好的对应关系。这些冬季风增强事件可以划分为 3 个大的时间阶段:

第 I 阶段: 8.2~4.8 kaBP 中高频波动期。此期间敏感粒级 2 揭示出 4 次冬季风增强事件, 时间分别为 8.1、6.8~6.6、5.8~5.6 和 5.4~4.9 kaBP。其中 8.1 ka 较强冬季风时期与北半球普遍发生的降温时间一致, 在 D03 岩芯 20~22 m 处形成一段细砂沉积层(图 2)。8.2~8.1 kaBP 降温事件在 1983 年由 BEGET 提出^[28], 在全球范围内也有较好的响应证据, 表明该时期的降温可能是全球性的, 如北欧孢粉^[29]、格陵兰冰芯氧同位素^[25]等都有很好的记录。6.8~6.6 kaBP 期间的冬季风增强对应冰芯的氧同位素曲线上升, 此降温事件在贵州七星洞全新世石笋氧同位素也有着良好的记录^[30], 属于一个冷暖波动期中的冷期。5.8~5.6、5.4~4.9 kaBP 冬季风增强对应格陵兰冰芯和敦德冰芯氧同位素曲线指示的低温期。DENTON 和 KARLÉN^[31]指出在 5.8~4.9 kaBP 出现了全球性的冰川前进, 该气候事件可能导致东亚冬季风显著增强。5.4~4.9 kaBP 期间, 敏感粒级 2 出现了 5 次高频波动, 时间间隔约 100 a, 与格陵兰冰芯的高频氧同位素变化周期一致(图 9), 代表了百年尺度的低温和冬季风增强事件。

第 II 阶段: 4.8~1.8 kaBP 波动较弱的稳定期。此期间敏感粒级 2 揭示出 4.7、3.8~3.7、3.2~

3.1、2.7~2.5、2.2~1.9 kaBP 共 5 期冬季风加强事件, 除 2.7~2.5、2.2~1.9 kaBP 2 期季风强度加强明显外, 整体上气候波动较弱。4.8~4.45 kaBP 是全球性的气温极冷期, 在全球范围内有多种古气候替代指标记录, 该次寒冷期导致气候降温幅度大且持续时间长, 对石笋的研究也指示了约 4.75 kaBP 出现了气候寒冷期^[32]; 此外, 沈吉等^[33]通过以青海湖沉积物研究发现, 大约 4.5 kaBP 气候开始出现向干冷转变的趋势。3.8~3.7 kaBP 的冬季风加强事件, 可能与 3.8 kaBP 的全球冷期相对应^[34], 葛全胜等^[35]重建近 5 千年气候变化序列, 发现了 3.8 kaBP 是最寒冷期。3.2~3.1、2.7~2.5 kaBP 的冬季风加强事件与格陵兰冰芯、敦德冰芯氧同位素曲线反映的北半球全新世新冰期 III 低温事件对应, 该事件的冷峰时间为 2.8 kaBP。中国历史文献中记录了在 2.8~2.75 kaBP 出现了气候极冷事件(相当于中国历史上的西周时期)^[36]。2.2~1.9 kaBP 的冬季风加强事件与 2 kaBP 左右的小冰期在时间上相吻合, 这一阶段的沉积物粗化不仅反映在敏感粒级 2, 还清晰地反映在敏感粒级 3 上(图 8), 与肖尚斌等^[12]提出的 2.28 和 1.88 kaBP 的 2 次东亚冬季风爆发事件具有同期性。岩芯 3.6~4.4 m 明显增加的细砂, 说明该时期沉积动力显著加强, 不仅反映了冬季风加强导致的沿岸搬运能力的提高, 也可能这一时期风暴活动加剧, 出现显著的垂直海岸方向的沉积物交换,

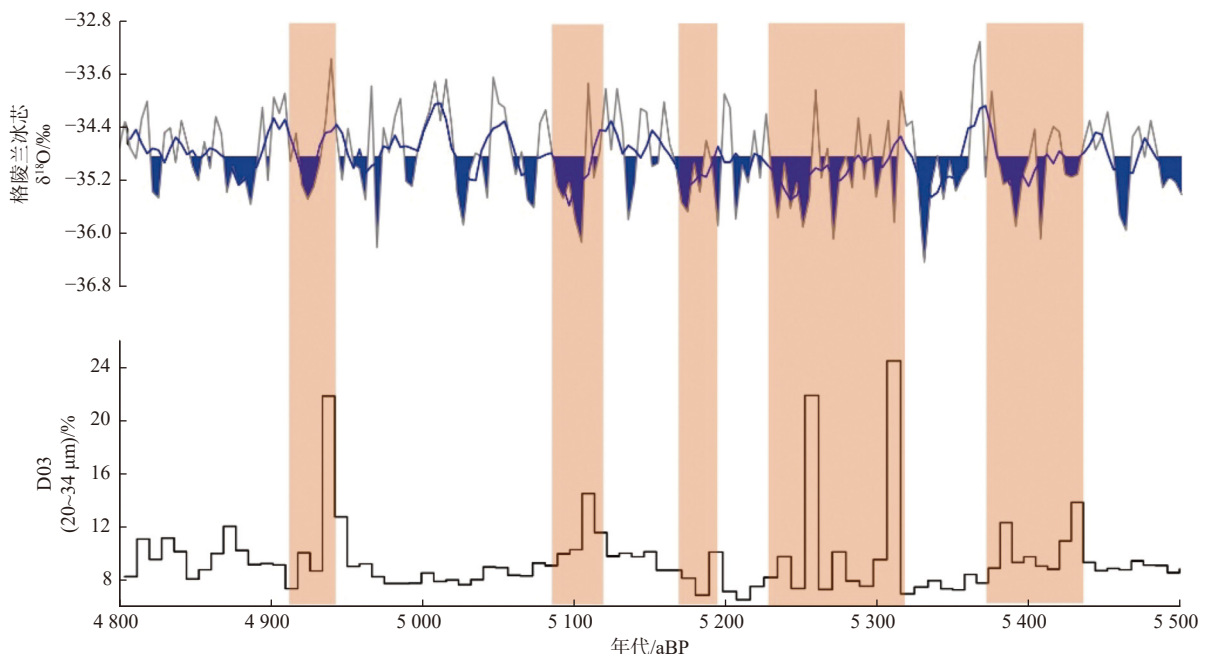


图 9 5.4~4.9 kaBP D03 岩芯敏感粒级与格陵兰冰芯氧同位素记录^[25]对比

Fig.9 Comparison between sensitive grain size of core D03 and oxygen isotopic records of Greenland ice core^[25] during 5.4~4.9 kaBP

该段低沉积速率(0.13 cm/a, 表 1)可能是受到风暴的侵蚀作用导致沉积层缺失的结果。

第Ⅲ阶段: 1.8 ka 以来高频波动期。这一阶段敏感粒级曲线呈现高频率波动, 共识别了 14 个冬季风加强事件, 对应于全新世晚期百年尺度的高频气候变化(图 10)。1.7~1.3 和 0.6~0.3 kaBP 2 个阶段的季风变化显著。1.7~1.3 kaBP 冬季风显著加强与中国两晋南北朝(公元 181—540 年)的低温阶段对应^[37-38], 与北大西洋 1.4 kaBP 浮冰事件处于同一时期^[39]。0.6~0.3 kaBP 冬季风显著加强则对应于小冰期(Little Ice Age), 相当于中国明清冷期(公元 1321—1920 年)^[37-38]。金川泥炭的植物纤维素氧同位素和敦德冰芯氧同位素都记录了该小冰期^[40, 26]。值得注意的是, 中国历史上记录的晚唐

(公元 811—930 年)冷期^[37-38], 在 D03 岩芯中记录并不明显, 可能是由于这一阶段的降温幅度相对较小(0.28 °C)和持续时间较短, 并叠加在隋唐和宋元暖湿背景上, 因此冬季风的变化并不显著^[37-38]。

值得说明的是, 不同种属的底栖有孔虫由于壳壁孔、壳壁结构疏松不同, 在埋藏环境中与周围介质发生接触和离子交换而引起不同程度的污染, 致使同一时期沉积的有孔虫¹⁴C 年龄不同程度变年轻。樊耘畅等^[40]对 D03 岩芯中由于有孔虫种属不同导致的测年数据差异进行了研究。本文讨论的东亚季风活动和格陵兰冰芯低温事件的时间差异, 除了因为不同区域上的气候响应差异外, 测年数据导致的时间偏移也应考虑在内, 未来工作中应进一步完善。

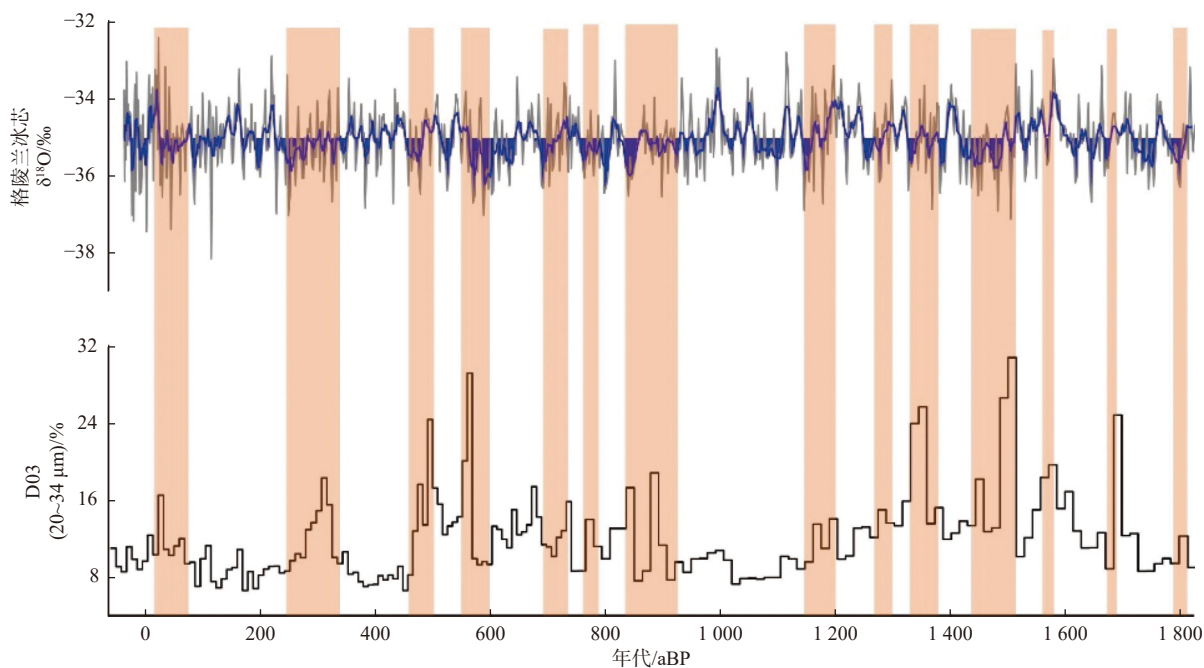


图 10 1.8 ka 以来 D03 岩芯敏感粒级与格陵兰冰芯氧同位素记录^[25]对比

Fig.10 Comparisons between sensitive grain size of core D03 and oxygen isotopic records of Greenland ice core^[25] since 1.8 kaBP

4 结论

(1)位于东海内陆架中部的 D03 岩芯记录了全新世高分辨率的气候和环境变化信息, 上部近 20 m 的细粒沉积物为 8 ka 以来的高位体系域沉积, 以泥质粉砂为主, 局部含有细砂层, 岩性均一, 沉积速率变化小, 代表相对稳定的沉积动力环境和物质来源。黏土矿物分析结果揭示, 沉积物主要来源于长江入海河流物质在浙闽沿岸流作用下的远端搬运。

(2)采用粒径-标准偏差法识别出 D03 上部岩芯 3 个敏感粒级组分, 其中, 敏感粒级组分 2(粒径区间 20~34 μm, 峰值 24.1 μm)反映沿岸流强弱变化, 对东亚冬季风的变化反应最敏感, 可作为东亚冬季风增强的替代指标。

(3)敏感粒级表征的东亚冬季风加强事件与石笋、冰芯和泥炭的氧同位素低值有良好的对应关系, 说明东亚冬季风加强与低温事件具有内在联系, 东海内陆架泥质区对全球气候变化有良好的区域响应。

(4) D03 岩芯记录了 8 ka 以来 3 个主要季风气候阶段,即 8.2~4.8 kaBP 中高频波动期、4.8~1.8 kaBP 波动较弱稳定期和 1.8 ka 以来的高频波动期。共识别 11 个千年尺度东亚冬季风显著增强事件,全球范围的“8.2 ka”、“4.7 ka”、“3.8 ka”、“1.4 ka”和明清小冰期等变冷事件均对应显著的东亚冬季风增强。

(5) D03 岩芯揭示了 5.4~4.9、1.8 kaBP 以来百年尺度的气候和东亚冬季风波动,对研究全球气候变化的海洋区域响应具有重要意义。

参考文献:

- [1] 孙东怀,安芷生,苏瑞侠,等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(3): 269-276.
- [2] 孙有斌,高抒,李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83-86.
- [3] 肖尚斌,李安春,蒋富清,等. 近 2 ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2233-2238.
- [4] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 229-246.
- [5] 杨作升,郭志刚,王兆祥,等. 黄东海陆架悬浮物向其东部深海区输运的宏观格局[J]. *海洋学报*, 1992, 14(2): 81-90.
- [6] HU B Q, YANG Z S, ZHAO M X, et al. Grain size records reveal variability of the East Asian winter monsoon since the Middle Holocene in the central Yellow Sea mud area, China[J]. *Science China Earth Science*, 2012, 55(10): 1656-1668.
- [7] XIAO S B, LI A C, LIU J P, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 237(2/4): 293-304.
- [8] ZHOU X, YANG W, XIANG R, et al. Re-examining the potential of using sensitive grain size of coastal muddy sediments as proxy of winter monsoon strength[J]. *Quaternary International*, 2014, 333(4): 173-178.
- [9] 徐方建,李安春,万世明,等. 东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 95-102.
- [10] 向荣,杨作升,SAITO Y,等. 济州岛西南泥质区近2300a来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. *中国科学(D辑)*, 2006, 36(7): 654-662.
- [11] 孙晓燕,李广雪,刘勇,等. 东海北部泥质区敏感粒度组分对东亚季风演变的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 11-17.
- [12] 肖尚斌,李安春,陈木宏,等. 近 8 ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2005, 30(5): 573-581.
- [13] Liu, J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 2141-2156.
- [14] 肖尚斌,李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122-129.
- [15] LIU J P, XU K H, LI A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85: 208-224.
- [16] 张晓东,许淑梅,翟世奎,等. 东海内陆架沉积气候信息的端元分析模型反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 29-36.
- [17] BISCAYE P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(7): 803-32.
- [18] YONEDA M, UNO H, SHIBATA Y, et al. Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 259(1): 432-437.
- [19] 朱亚美. 中全新世以来东海内陆架泥质区南部沉积演化及其气候环境响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2020.
- [20] 肖尚斌,李安春,陈木宏,等. 全新世东亚季风变化的百年尺度周期[J]. *科技导报*, 2006, 24(4): 40-43.
- [21] 王亮. 东海典型泥质区高分辨沉积记录及其对气候环境变化的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [22] 田元,范德江,张喜林,等. 东海内陆架沉积物敏感级级构成及其地质意义[J]. *海洋与湖泊*, 2016, 47(2): 30-37.
- [23] ZHOU X, LIU Z H, YAN Q, et al. Enhanced tropical cyclone intensity in the western north Pacific during warm periods over the last two millennia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(15): 9145-9153.
- [24] 姚檀栋,谢自楚,武筱龄,等. 敦德冰帽中的小冰期气候记录[J]. *中国科学(B辑)*, 1990, 20(11): 1196-1201.
- [25] STUIVER M, GROOTES P M, BRAZIUNAS T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16, 500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(3): 341-354.
- [26] 洪业汤,姜洪波,陶发祥,等. 近 5 ka 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(6): 525-530.
- [27] WANG Y J, CHENG H, EDWARDS R L. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308: 854-857.
- [28] BEGET J E. Radiocarbon-dated evidence of worldwide early Holocene climate change[J]. *Geology*, 1983, 11(7): 389-393.
- [29] SEPPÄ H, BLRKS H J B, GLESECKE T, et al. Spatial structure of the 8 200 cal yr BP event in Northern Europe[J]. *Clim Past Discuss*, 2007, 3: 165-195.
- [30] 蔡演军,彭子成,安芷生,等. 贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化[J]. *科学通报*, 2001, 46(16): 1398-1401.
- [31] DENTON G H, KARLÉN W. Holocene climatic variations: their pattern and possible cause[J]. *Quaternary Research*, 1973, 3: 155-205.
- [32] 覃嘉铭,袁道先,程海,等. 新仙女木及全新世早中期气候突变事件: 贵州茂兰石笋氧同位素记录[J]. *中国科学(D辑)*,

- 2004, 34(1): 39-74.
- [33] 沈吉, 刘兴起, MATSUMOTO R, 等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化[J]. 中国科学(D辑), 34(6): 582-589.
- [34] 杨怀仁. 第四纪地质[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 1-428.
- [35] 葛全胜, 王顺兵, 郑景云. 过去5000年中国气温变化序列重建[J]. 自然科学进展, 2006, 16: 689-696.
- [36] 侯甬坚, 祝一志. 历史记录提取的近5~2.7 ka黄河中下游平原重要气候事件及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 23-29.
- [37] 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 中国历史时期气候变化影响及其应对的启示[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 23-29.
- [38] 葛全胜, 朱会义. 两千年来中国自然与人文地理环境变迁及启示[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 3-14.
- [39] BOND G, SHOWERS W, CHESEBY M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates[J]. Science, 1997, 278: 1257-1266.
- [40] 樊耘畅, 丁旋, 樊加恩, 等. 东海陆架浙闽沿岸泥质区不同属种底栖有孔虫对¹⁴C测年的影响及其原因初探[J]. 第四纪研究, 2018, 38(3): 792-798.

Response of high-resolution sedimentary records to East Asian winter monsoon in the inner shelf of the East China Sea over the past 8 000 years

ZHU Yamei^{1,2}, TIAN Yuan^{2*}, YIN Ping^{2,3}, DUAN Xiaoyong², CAO Ke², LIU Dongyan¹

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China;

3 Zhoushan Field Scientific Observation and Research Station for Marine Geo-hazards, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: Through high resolution AMS¹⁴C dating and grain size analysis on upper layer sediments of the core D03 in the muddy area of inner shelf of the East China Sea, three sensitive grain groups were extracted and used as proxies of East Asian winter monsoon strength. During the past 8 ka, eleven millennium scale events and centennial scale rapid climatic events during 5.4~4.9 kaBP and in the past 1.8 kaBP were revealed. By comparison with records of other proxies from oxygen isotopes of stalagmites, ice cores and peat, it is indicated that the enhancement of East Asian winter monsoon in the study area was well correlated with the global cooling events, e.g. "8.2 ka", "4.9 ka", "3.8 ka", "1.4 ka" and Little Ice Age. The inner relationship between the East Asian winter monsoon enhancement and the climate cooling event during the Holocene was established. The evolution of the East Asian winter monsoon in the past 8000 years can be roughly divided into three stages, including the intermediate and high frequency fluctuation stage during 8.2~4.8 kaBP, the weak and stable stage during 4.8~1.8 kaBP, and the high frequency fluctuations stage since 1.8kaBP.

Key words: inner shelf of the East China Sea; sensitive grain size; East Asian winter monsoon; Holocene; sedimentary record